

「J-STAR[®] Welding」を用いた高能率溶接技術の開発

Development of High Efficiency CO₂ Gas Shielded Arc Welding Process with “J-STAR[®] Welding”

片岡 時彦 KATAOKA Tokihiko JFE スチール スチール研究所 接合・強度研究部 主任研究員(副課長)
中川 郷司 NAKAGAWA Satoshi JFE スチール 建材センター 建材技術部建築技術室 主任部員(課長)
石井 匠 ISHII Takumi JFE 技研 土木・建築研究部 主任研究員(課長)・博士(工学)

要旨

J-STAR[®]* Welding は、極性を従来の棒プラスに対して逆の棒マイナスとし、適量の希土類金属 (rare earth metal) を添加したワイヤを用いる CO₂ アーク溶接法である。この溶接法は 250 A 以上の高電流溶接においてワイヤ先端を頂点とする円錐状のアークプラズマを形成することで、ワイヤ先端から熔融池へ移行する溶滴は微細かつ連続化した微細スプレー移行を達成し、従来比 1.5 倍の深い溶込みが得られる。この特性を利用した狭開先溶接について検討し、I 形-Gap5 mm およびレ形 25°-Gap2 mm の高能率溶接施工技術を確認した。また、この狭開先溶接を適用した柱・梁継手は載荷試験において十分な変形能力を有していることを確認した。

Abstract:

The J-STAR[®] Welding is performed with an electrode negative polarity using the rare earth metal added wire in CO₂ gas shielded arc welding. With the welding current over 250 A of the J-STAR welding, a conical arc plasma is formed from the wire tip, fine droplets transfer to molten pool continuously, which is called spray transfer, and the penetration depth of bead-on welding increased by 50%. The result of examination of narrow gap welding, utilizing the spray transfer phenomenon, the J-STAR Welding established high efficiency narrow gap welding with 5 mm-gap square groove and 25° single bevel groove of 2 mm gap. It was confirmed that the joint between the column and beam which the J-STAR narrow gap welding was applied had sufficient deformation capacity under the load test.

1. はじめに

CO₂ アーク溶接は 1950 年代に開発¹⁾され、溶接電源と溶接材料の改良により、能率の優れた接合技術としてアーク溶接法の主流を占めるまでに発展してきた^{1~3,16~18)}。ガスコストが安い反面、溶接時に多量のスパッタが発生するため、アークの安定化による溶接作業性の改善とさらなる高能率化が強く要望されている¹⁾。

以上のような要望にこたえるべく開発した「J-STAR[®] (JFE Spray Transfer Arc) Welding」は、安定した円錐状アークの形成と微細かつ連続化したスプレー移行の実現により極低スパッタ化を可能にした^{4~6)}。また、アークの集中と安定化効果により溶接ビード中央部に従来比 1.5 倍の深い溶込み⁵⁾が得られる。これらの効果は、厚板のアーク溶接に用いられる電流域 (250 A 以上) で顕著であり、課

題とされた 200 A 以下の低電流域でも電流波形制御の適用により規則的な短絡移行が得られた⁷⁾。その結果、「J-STAR Welding」は、広い電流範囲で極低スパッタ化を達成した。高速溶接においても溶接線方向に均一なビード形状が得られることから、高能率溶接技術への展開が期待される。これら「J-STAR Welding」の特長とそれを活用した狭開先溶接技術について紹介する。

2. 極低スパッタ CO₂ アーク溶接技術 「J-STAR Welding」

従来の CO₂ アーク溶接法の極性が棒プラス (DCEP) であるのに対して、J-STAR Welding は、アーク安定剤として適量の REM (rare earth metal) をワイヤに添加し、通常とは逆の棒マイナス (DCEN) を採用した溶接方法である。

2.1 J-STAR Welding ワイヤ 「KC-500」

表 1 に J-STAR Welding ワイヤ KC-500 の化学組成の一例を示す。KC-500 は、JIS Z 3312 における YGW11 に該当し、

2007 年 8 月 15 日受付
*J-STAR は JFE スチール(株) の登録商標である。

表 1 溶接用ワイヤの化学組成の一例

Table 1 Example of chemical composition of steel welding wire

| Type | (mass%) | | | | | | |
|-------------------------|---------|-----|-----|------|------|-----|--------|
| | C | Si | Mn | P | S | Ti | Others |
| Si-Mn-Ti-REM KC-500* | 0.05 | 0.7 | 1.6 | 0.01 | 0.01 | 0.2 | REM |

*JIS Z 3312YGW11

表 2 溶接金属の化学組成と機械的性質の一例

Table 2 Chemical composition and mechanical properties of deposited metal

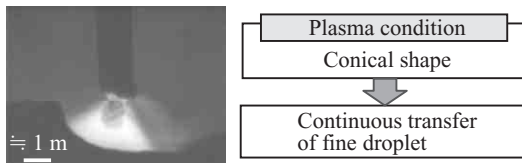
| Chemical composition (mass%) | | | | | Mechanical properties | | | |
|------------------------------|------|------|------|------|--|---------------------------------------|----------------|----------------------------|
| C | Si | Mn | P | S | 0.2% proof stress (N/mm ²) | Tensile strength (N/mm ²) | Elongation (%) | Absorbed energy at 0°C (J) |
| 0.06 | 0.40 | 0.96 | 0.01 | 0.01 | 470 | 560 | 32 | 160 |

微量の REM を添加したワイヤである。

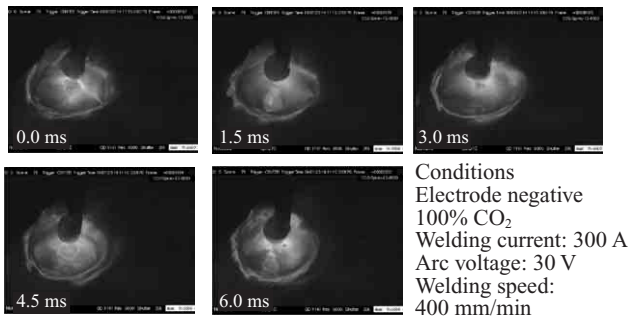
表 2 に KC-500 を用いた CO₂ アーク溶接の全溶着金属試験結果を示す。490 N/mm² 級鋼用溶接ワイヤとして十分な強度、靱性を有している。また、溶接ワイヤ中に微量の REM を含有させることで、強度レベルに関係なく J-STAR Welding としての溶接諸特性が得られることを確認しており、540 N/mm² 級および 590 N/mm² 級鋼用溶接ワイヤへの展開も容易である。

2.2 アーク現象

高電流 CO₂ アーク溶接で観察されるアーク現象の特徴は、ワイヤ先端に懸垂した溶滴下部へのアーク集中とそれによって生じる溶滴の不規則な揺動にあり、スパッタの発生はこの溶滴の不規則な揺動によって引き起こされる。具



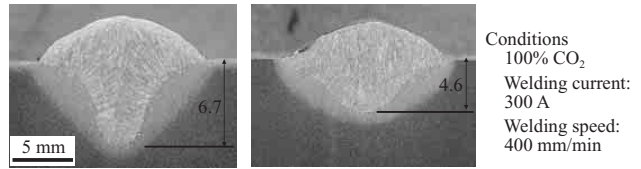
(a) Side video camera



(b) Upper video camera

写真 1 J-STAR Welding の溶滴移行現象

Photo 1 Images of droplet transfer with J-STAR Welding



(a) J-STAR Welding (b) Conventional welding

写真 2 ビードオンプレート溶接の断面マクロ組織

Photo 2 Macrostructure of bead-on-plate welding

体的には、溶滴と溶融池の短絡後の再アークにおける溶融金属の飛散、あるいはアーク力による溶滴そのものの飛散などによって生じると考えられ、スパッタの発生は溶滴の粗大化によってさらに助長される⁸⁾。

写真 1 に J-STAR Welding (KC-500, 棒マイナス) のアーク現象を示す。側方および斜め上方から高速度ビデオを用いて撮影した。従来の CO₂ アーク溶接の溶滴移行間隔は平均で 37 ms、しかもその間隔は 29~48 ms と大きく変動する⁵⁾。しかし、J-STAR Welding の溶滴移行間隔は、約 4.5 ms と非常に短く、しかも連続した溶滴移行になっており、いわゆる「スプレー移行」が観察された。また、斜め上方からの高速度ビデオ観察により、溶融池がアーク直下で深く掘り下げられる現象が確認された。

2.3 J-STAR Welding の溶接特性

J-STAR Welding は、ワイヤ先端を頂点とする安定した円錐状アークを形成し、最も理想的な溶滴移行と考えられる微細スプレー移行を CO₂ アーク溶接において初めて実現した。以下に、J-STAR Welding の特長を列挙する。

- (1) スパッタ発生量は従来の 1/10 に低減する。
- (2) 溶接ビード近傍のスパッタ付着がない。
- (3) ヒューム発生量は従来の 1/2 に低減する。
- (4) 溶込み深さは従来の 1.5 倍に増加する (写真 2)。
- (5) アーク音がソフト、音圧は従来の 1/2 に低減する。

これら J-STAR Welding 特性によって、溶接ラインの作業環境改善と高能率溶接への展開が期待される。

3. 厚板の溶接

図 1 に溶接電流とスパッタ発生量の関係を示す。J-STAR Welding (KC-500, 棒マイナス) では、従来溶接 (KC-50, 棒プラス) と比較して大幅なスパッタ低減が達成されており、その効果は溶接電流 250~400 A の広い範囲で著しい。

J-STAR Welding (KC-500, 棒マイナス) ビードオンプレート溶接における断面マクロ組織を写真 2(a) に、外観を写真 3 に示す。ビード近傍へのスパッタ付着がなく、ビード中央には従来比約 1.5 倍の深い溶込みが認められる。REM を添加していない従来ワイヤを用いた棒マイナスの CO₂ アーク溶接は、棒プラスに対して溶込み深さは約 1/2 に減少し、ワイヤの溶融速度は約 1.5 倍に増加する。J-STAR Welding

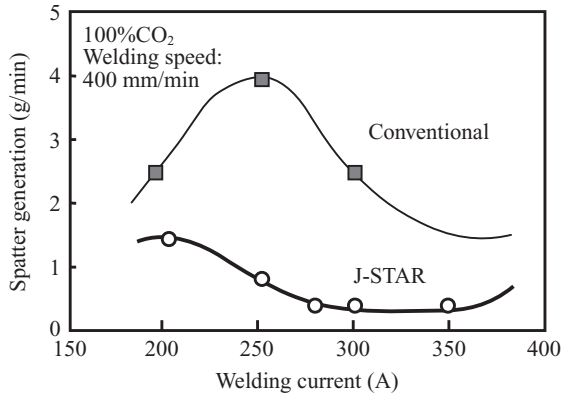


図1 溶接電流とスパッタ発生量の関係

Fig. 1 Relationship between welding current and spatter generation



10 mm

Conditions
 Electrode negative, 100% CO₂
 Welding current: 300 A
 Arc voltage: 30 V
 Welding speed: 400 mm/min

写真3 J-STAR ビードオンプレート溶接部の外観

Photo 3 Weld bead appearance of bead-on-plate welding with J-STAR

は、ワイヤに適量の REM を添加することで安定かつ集中した円錐状アークの形成により棒マイナスの溶接でありながら従来の棒プラスの CO₂ アーク溶接に対して約 1.5 倍の深い溶込みが得られる⁵⁾。また、ワイヤの熔融速度は、従来の棒プラスの溶接と同等である。

3.1 J-STAR を用いた高能率狭開先溶接技術

狭開先溶接は、開先断面積の低減と溶接施工時間の短縮が可能であるが、初層溶接における開先底部での安定したアーク発生および積層溶接における開先面へのスパッタ付着防止が重要となる¹⁹⁾。この課題を解決する方法として、

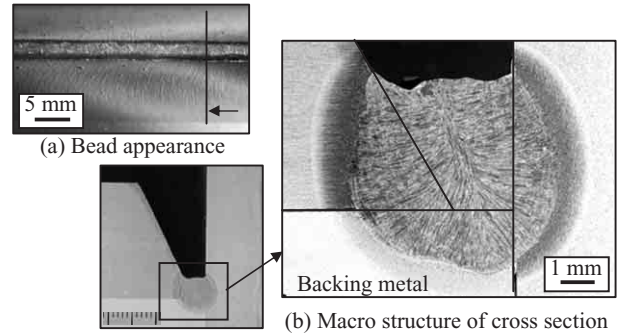


写真4 T継手1パス溶接後の外観と断面マクロ組織

Photo 4 Bead appearance and macro structure of T joint specimen after 1 pass welding (Single bevel groove, Groove angle 25°, Gap 2 mm)

電流波形制御あるいはシールドガス組成制御が有効との報告⁹⁾がなされている。J-STAR Welding はスパッタの発生が少なくアークの集中と安定性に優れることから、これら制御機構を用いることなく狭開先の溶接が可能である。

写真4に J-STAR Welding を用いたレ形 25°-Gap2 mm 狭開先の初層溶接部の外観とマクロ組織を示す。溶接電流は 350 A、溶接速度は 80 cm/min とした。従来の棒プラスの CO₂ アーク溶接および MAG 溶接では、アーク変動による溶込みの不足およびビードの不均一を生じやすい。これに対して J-STAR Welding は、スパッタ付着がなく、均一な溶接ビード形状と深さ 2 mm の安定した溶込みが確認された。

写真5に板厚 25 mm の突合せ溶接継手のマクロ組織を示す。開先形状は (a) 無開先 (I 形)-Gap5 mm、(b) レ形 25°-Gap2 mm、(c) レ形 35°-Gap7 mm (日本建築学会 建築工事標準仕様書 JASS6 鉄骨工事 標準仕様) とした。いずれの継手も J-STAR Welding の特長である低スパッタ性とアーク集中による深い溶込みによって欠陥のない良好なマクロ組織が得られた。

図2に突合せ溶接可能な開先角度とギャップ(ルート間隔)の関係を示す。J-STAR Welding は、従来法に対してより狭い角度および狭い Gap の溶接が可能である^{10~11)}。

表3にパス間温度 250°C での J-STAR 狭開先溶接における溶接金属の機械的性質を示す。溶接金属の 0°C シャルピー吸収エネルギー(ノッチ位置:溶接金属中央, 1/2t)は無開先

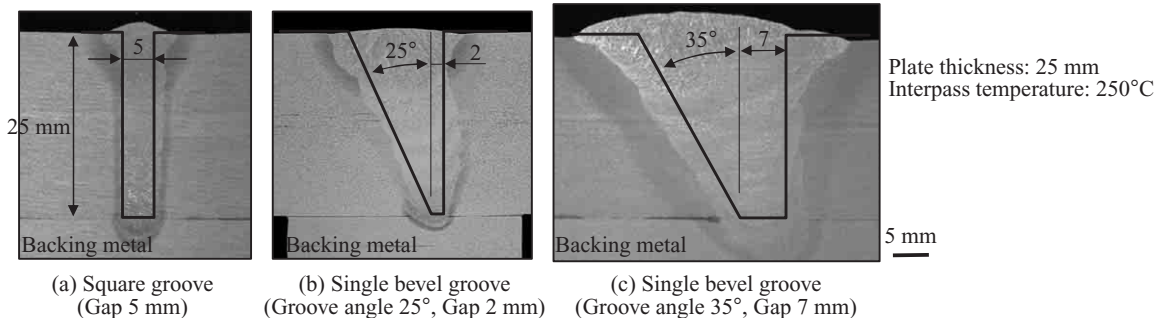


写真5 突合せ溶接部の断面マクロ組織

Photo 5 Macrostructure of butt joints

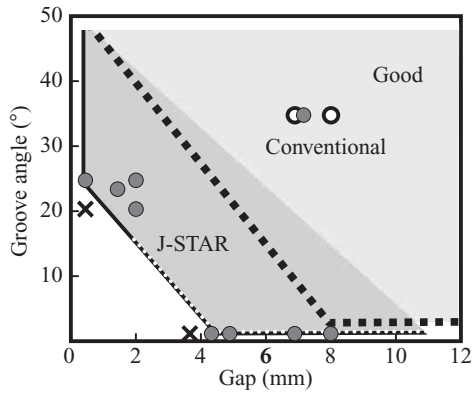


図2 健全な溶接が可能な開先角度とギャップの範囲
Fig.2 Gap and groove angle map for good welded joint

表3 J-STAR 狭開先溶接金属の機械的特性

Table 3 Mechanical properties of welded metal with J-STAR narrow gap welding

| Groove type | Heat Input (kJ/cm) | Mechanical properties | | | |
|------------------------------------|--------------------|--|---------------------------------------|----------------|----------------------------|
| | | 0.2% proof stress (N/mm ²) | Tensile strength (N/mm ²) | Elongation (%) | Absorbed energy at 0°C (J) |
| Square groove (Gap 5 mm) | 6-10 | 612 | 654 | 29 | 138 |
| Single bevel groove (25°-Gap 2 mm) | 6-30 | 412 | 517 | 34 | 143 |

Butt joint
Plate thickness: 25 mm
Interpass temperature: 250°C

(I形)-Gap5 mm, レ形 25°-Gap2 mm とともに 100 J 以上, 引張り強さは a 無開先 654 N/mm², レ形 25° 開先 517 N/mm² を得た¹²⁾。490 MPa 級鋼の継手として十分な強度と靱性である。狭開先の多層溶接継手は高冷速となることから溶接金属の継手強度と靱性の確保が容易であり, パス間温度の緩和が期待できる。

図3に溶接パス間温度 250°C 以下の管理における溶接電流と鋼板温度履歴を示す。継手は, 板厚 25 mm, 溶接長さ 300 mm の突合せとし, 開先形状は (a) I 形-Gap5 mm, (b) レ形 25°-Gap2 mm, (c) レ形 35°-Gap7 mm とした。開先断面積は (a)125 mm², (b)196 mm², (c)394 mm² となり, この時のアークタイムは (a)198 s, (b)341 s, (c)536 s と開先断面積にほぼ比例した。溶接施工時間はパス間温度 250°C の管理によりそれぞれ (a)447 s, (b)778 s, (c)1954 s とアークタイム以上の差が生じ, (c) レ形 35°-Gap7 mm (日本建築学会建築工事標準仕様書 JASS6 鉄骨工事 標準仕様) に対する溶接施工時間比率は (a) I 形-Gap5 mm の施工で 1/4, (b) レ形 25°-Gap2 mm で 2/5 にまで減少した。以上のことから, パス間温度の管理を必要とする多層溶接において, J-STAR 狭開先溶接は冷却待ち時間の短縮によりさらなる高能率化が期待できる。

3.2 J-STAR 狭開先溶接の開先標準

表4に J-STAR 狭開先溶接の標準開先を示す。推奨の開先形状は無開先 (I 形)-Gap5 mm, レ形 25°-Gap2 mm である。なお, KC-500 を用いた J-STAR 狭開先溶接法は, 建築鉄骨分野への適用拡大を考慮して財団法人日本建築総合試験所の建築技術性能証明を 2007 年 5 月に取得した。

3.3 柱 - 梁接合部の載荷試験

角形鋼管柱と H 形鋼梁の仕口部を対象に繰返し載荷実験を行い, J-STAR 狭開先溶接による梁フランジ継手の性能を評価した。図4に載荷装置および試験体形状を示す。梁は溶接組立 H 形鋼 (SN490B), 柱は冷間成形角形鋼管 (BCR295), 通しダイアフラムは板厚 28 mm (SN490C) とすることで梁以外は塑性化しない断面寸法とした。継手部はノンスラップとし算出される梁端接合部係数は 1.29 であり, ひずみ硬化を考慮する場合の接合部係数を満足している。梁フランジとダイアフラムの溶接部に J-STAR 狭開先溶接 (a) 無開先-Gap 5 mm, (b) レ形 25° 開先-Gap

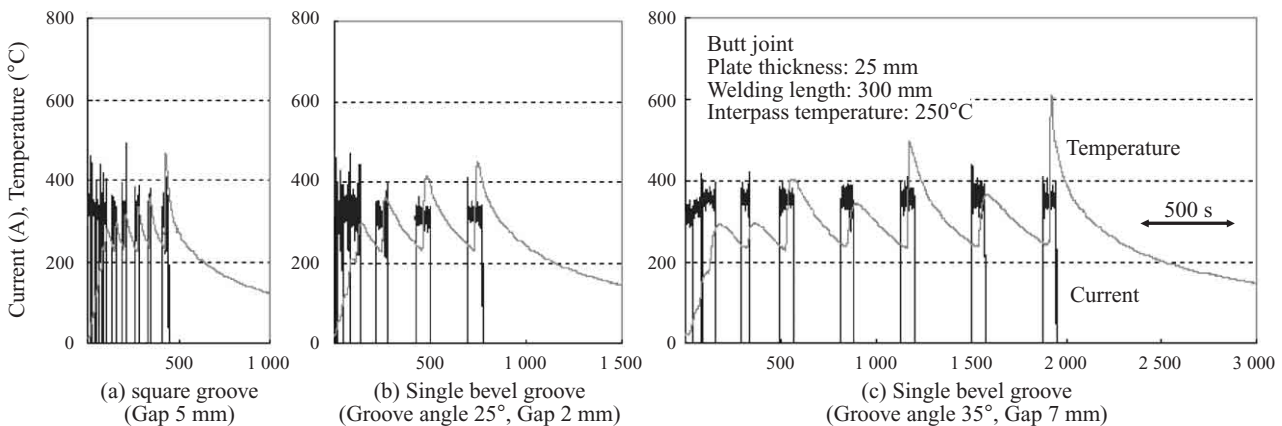
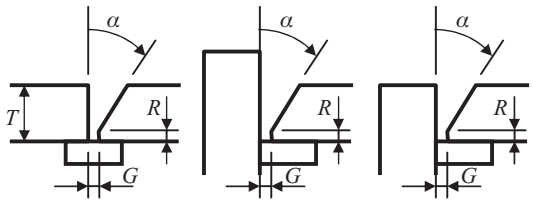



図3 溶接電流と試験体の温度履歴

Fig.3 Change in welding current and temperature of specimen

表 4 J-STAR 狭開先溶接の開先標準
Table 4 J-STAR narrow gap welding groove standard

| Groove type | Welding position | Parameter | range |
|--|---------------------------------------|-----------------------------|--------------------|
| Single bevel groove  JS-BL-1B JS-TL-1B JS-CL-1B | Flat position and horizontal position | T: Thickness (mm) | $6 \leq T$ |
| | | G: Gap (mm) | $1.5 \leq G$ |
| | | R: Root face (mm) | $0 \leq R \leq 2$ |
| | | α : Groove angel (°) | $23 \leq \alpha$ |
| Square groove  JS-BI-1B JS-CI-1B | Flat position | T: Thickness (mm) | $6 \leq T \leq 25$ |
| | | G: Gap (mm) | $4.5 \leq G$ |

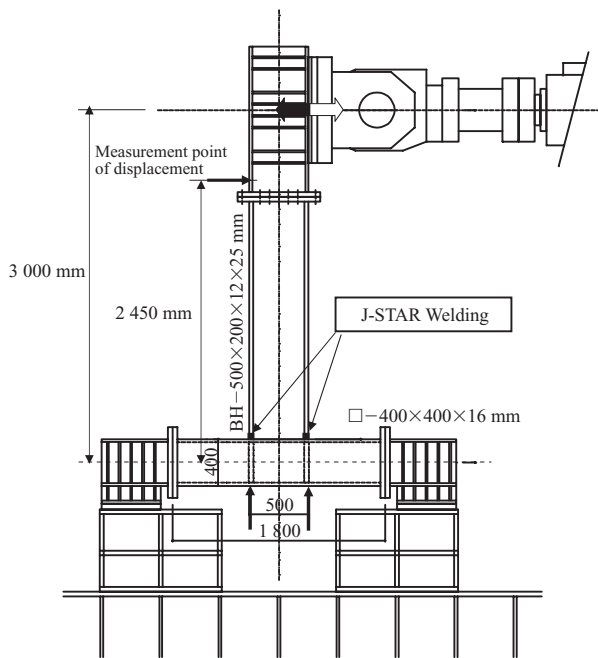


図 4 荷重試験と試験体の形状
Fig.4 Specimen and loading set-up

2 mm を適用した。溶接条件は、両試験体とも最大入熱 30 kJ/cm 以下、パス間温度 250°C 以下である。荷重試験体の固定は柱端部を高力ボルト接合とし、梁端部に交番繰返し荷重（図中、黒矢印と白矢印を交互に繰返す）を与えた。図 5 に荷重プログラムを示す。全断面を有効として得られる梁部材の全塑性モーメント M_p 時における弾性変形角計算値 θ_p を基準にして $2\theta_p$ 、 $4\theta_p$ 、 $6\theta_p$ で各 2 回正負に繰返し荷重するプログラムとした。この時点までに終局に至らない場合は、破壊するまで $6\theta_p$ で正負に繰返し荷重し続けることとした。なお、荷重に先立ち、試験体の初期不整を取り除くことや実験治具とのなじみを取ることを目的に弾性

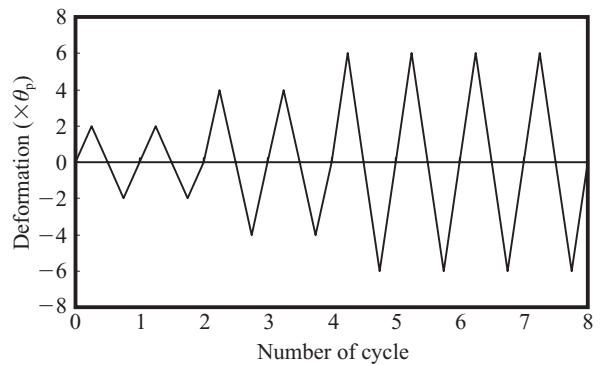


図 5 荷重プログラム

Fig.5 Schematic illustration of deformation cycle

範囲内で 2 回正負繰返し荷重を行った（予備荷重）。また、荷重中の柱梁接合部は冷却 BOX で囲み、その中に液体窒素を送り込むことで、試験体溶接部の温度を 0°C に保持した。

図 6 に梁端相対変形角 θ と梁端フェースモーメント M の関係を示す。開先形状を I 形-gap5 mm とした試験体 (a) は、 $\pm 6\theta_p$ の 1 サイクル目の荷重までは安定した紡錘形の履歴特性を示したが、 $6\theta_p$ の 2 サイクル目正荷重時に梁フランジと梁ウェブの交差部から梁フランジが脆性破壊した。起点部にはほとんど延性亀裂は観察されなかった。なお、梁端フランジ溶接始末端部には延性亀裂が確認された。開先形状をレ形 25°-gap2 mm とした試験体 (b) は、 $\pm 6\theta_p$ の 3 サイクル目の荷重までは安定した紡錘形の履歴特性を示したが、 $6\theta_p$ の 4 サイクル目負荷時に梁フランジとダイアフラムの溶接部始末端部から脆性破壊した。また、累積塑性変形倍率 η_A は試験体 (a) 47、試験体 (b) 111 であり、構造ランク I を条件とした場合の耐振安全性に問題ない¹³⁾とされる累積塑性変形倍率 $\eta_A \geq 10$ を大きく超えた。また、通し

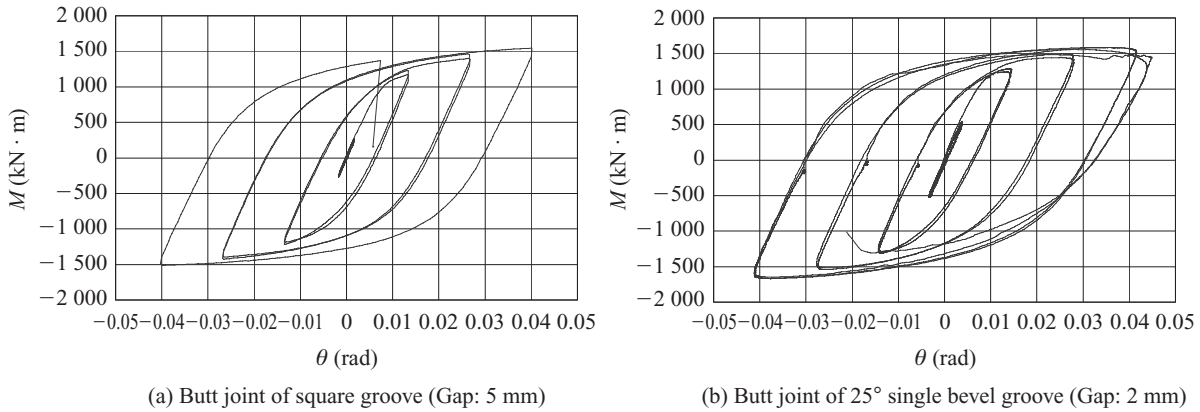


図6 荷重試験における梁端相対変形角と梁端フェースモーメントの関係

Fig.6 Relation between relative rotation of beam end connection and moment of beam end

ダイアとコラム溶接部に試験体(b)と同じレ形25°-Gap2mmの狭開先溶接を施し、柱-柱接合部の荷重試験を実施しており、この荷重試験においても変形能力としては十分であることを確認している¹⁴⁾。

4. おわりに

「J-STAR Welding」は、微細スプレー移行の実現により極低スパッタ化が可能であり、CO₂アーク溶接では避けられなかった溶接後の付着スパッタ除去作業や手直しが削減できる。また、J-STAR狭開先溶接は、開先断面積の低減にともなうアークタームの短縮と多層溶接における冷却待ち時間の短縮による溶接施工の高能率化が期待できる。さらに、微細溶滴の連続的な移行は、アーク電流値を安定化させることから溶接金属の品質、溶接ビード形状の安定化にも効果があると考えられ、今後、厚板の高能率組立溶接での活用が期待される。

参考文献

- 1) 三田常夫. 溶接学会誌. 1990, 第50集, no.8, p.564-568.
- 2) 阿草一男, 山内信幸. 溶接学会誌. 1981, 第50集, no.11, p.1059-1065.
- 3) 阿草一男, 山内信幸. 溶接学会誌. 1981, 第50集, no.11, p.1066-1074.
- 4) 片岡時彦, 池田倫正, 小野守章, 安田功一. 溶接学会講演概要集. 2002, 第75集, p.250-251.
- 5) 片岡時彦, 池田倫正, 小野守章, 安田功一. 溶接学会講演概要集. 2002, 第75集, p.252-253.
- 6) 片岡時彦, 池田倫正, 小野守章, 安田功一. 溶接技術. 2005, vol.53, no.3, p.64-69.

- 7) 片岡時彦, 池田倫正, 安田功一. JFE技報. 2007, no.16, p.50.
- 8) 片岡時彦, 池田倫正, 安田功一. 溶接学会論文集. 2007, vol.25, no.3, p.410-415.
- 9) 中村照美, 平岡和雄. 溶接学会論文集. 2001, vol.19, no.1, p.44-53.
- 10) 片岡時彦, 池田倫正, 小野守章, 安田功一. 溶接学会講演概要集. 2006, 第78集, p.136-137.
- 11) 片岡時彦, 池田倫正, 小野守章, 安田功一. 溶接学会講演概要集. 2006, 第79集, p.110-111.
- 12) 石井匠, 中川郷司, 片岡時彦, 池田倫正. 溶接学会講演概要集. 2007, 第80集, p.92-93.
- 13) 鋼構造接合部の力学的性状に関する研究の現状. 日本建築学会. 1993-10, p.126-134.
- 14) 石井匠, 中川郷司, 片岡時彦, 池田倫正. 溶接学会講演概要集. 2007, 第80集, p.94-95.
- 15) 鈴木春義. 炭酸ガスおよびノンガスアーク溶接. 1970, 産報.
- 16) 安藤弘平, 長谷川光雄. 溶接アーク現象. 1962, 産報.
- 17) 伊藤崇明, 奥石房樹, 佐藤正晴, 菅哲男, 牛尾誠夫. 溶接学会論文集. 1997, vol.15, no.3, p.432-437.
- 18) 荒井敏夫, 六条正治, 山田忠昭, 菅哲男. 溶接学会論文集. 1983, vol.1, no.2, p.177-182.
- 19) 妹島五彦, 五代友和, 河原稔, 野村博一. 溶接学会誌. 1981, vol.50, no.11, p.50-56.



片岡 時彦



中川 郷司



石井 匠